

高輝度 Yb:YAG 固体レーザー技術に関する研究

高出力・短パルス Yb:YAG レーザの開発

(2)高出力超短パルスレーザー増幅器の開発

ふくい産業支援センター 末田敬一、福井大学 川戸栄

[研究の概要] Yb:YAG が高出力・高効率連続光 (CW) 発振および超短パルスレーザー発振の利得媒質として期待されているが、産業用に超微細加工、高速・高精度加工用レーザーの開発を目的として LD 励起薄型スラブ型 Yb:YAG 超短パルスレーザーの増幅器開発を行った。高密度励起および高冷却効率が可能な Yb:YAG レーザ増幅モジュールを試作し、高出力かつ高効率 CW および超短パルス動作を実現した。

[成果展開可能なシーズ]

高平均出力超短パルスレーザーシステム

フェムト秒レーザー増幅モジュール

1. はじめに

近年、レーザー技術は科学技術から産業技術に至る広範な分野に急速に普及し、基盤的技術として確立しつつある。また、応用範囲の拡大とともにレーザーの高出力化、短パルス化が大きく進歩してきている。加工分野では、超短パルスレーザーの特徴である熱影響を排除した断熱加工や、集光により大きな光強度を作り出せる性質を利用して、従来よりも短時間で高精度の加工ができ、さらには材料の物理的・化学的性質の変化をとまなう新しいナノ加工技術の進展が期待されている。

このような状況の下、室温動作する高出力・高効率・高寿命の半導体レーザー (LD) の開発が進み、それにより LD 励起固体レーザーが小型、高効率、高安定動作が可能などの特徴から、多くの研究機関で精力的に研究されている。そのレーザー媒質で注目されているのが準 4 準位系材料の Yb:YAG で、原子量子効率が高く、高効率動作が可能である。また、ホスト媒質である YAG は熱伝導率が高いため、励起に付随する発熱が小さく、熱効果の影響を抑えることが可能で、高ビーム品質が期待できる。また、利得バンド幅も広く、Ti:Sapphire レーザに代わる LD 励起全固体レーザーとして注目されている。現在、超短パルスレーザーとして一般的に普及しているチタンサファイアレーザーは、数 fs の超短パルス発生が可能であり、超高速・超高強度レーザー物理をはじめとして、様々な基礎研究の分野に応用されている。しかしながら、市販の加工用超短パルスレーザーの場合、平均出力は 1 W 程度、パルス繰り返し周波数も 10 kHz 程度と低く、加工速度が遅く、研究開発用には使えても加工用に利用できない原因となっている。

そこで我々は、産業用に加工応用を主な目的として、高平均出力 LD 励起 Yb:YAG 超短パルスレーザーシステムの開発を行った。

2. 研究目的と内容 (フェーズ)

超短パルス増幅システムの要素技術の開発を行った。具体的には、増幅モジュールの開発として、(1) 結晶形状の最適化、(2) 冷却方法の開発、(3) CW 発振による性能評価を行う。特性の達成目標は CW 出力 300W、ビーム品質 TEM₀₀ モード、光-光変換効率 40% 以上である。また、開発した増幅モジュールを用いてナノ秒パルスレーザーシステムを開発する。達成特性の目標値は平均出力 25W、ビーム品質 TEM₀₀ モード、パルス幅 1 ~ 10 ns、繰り返し周波数 10kHz である。

3. 研究成果 (フェーズ)

3.1 背景

Yb:YAG 結晶を用いた LD 励起スラブ型レーザの研究としては TRW 社、Stanford 大学、Heriot-Watt 大学等で研究が行われており、TRW 社では出力 415W (1400W 励起、マルチモード)、光 - 光変換効率 30%、出力 252W (1400W 励起、 $M^2=1.45$)、光 - 光変換効率 18% を達成し、Stanford 大学では出力 43W (260W 励起、 $M^2=13$)、光 - 光変換効率 17% を達成し、Heriot-Watt 大学では出力 160W を達成している。

本プロジェクトでは、出力と光 - 光変換効率のさらなる向上を目指し、結晶内の温度上昇を抑制し、かつ励起強度を高めるために、結晶の厚みが極めて薄いスラブ状結晶を用いた新しい LD 端面励起 Yb:YAG 薄型スラブレーザの開発を行った。

3.2 高出力 Yb:YAG 薄型スラブレーザ発振器

3.2.1 端面励起薄型スラブ構成の特徴

LD 励起固体レーザの励起方式は端面励起方式と側面励起方式に大別される。側面励起がレーザ光と励起光が直行しているのに対して、端面励起方式は励起光とレーザ光の軸を同一方向とすることで高吸収効率を実現し、発振領域と励起領域が容易に一致することで高いモードマッチング効率を得られ、そのため高効率動作が期待でき、高ビーム品質の出力を得ることが可能である。レーザ結晶の形状に関してはロッド型[1-3]、ディスク型[4-6]、スラブ型[7,8]、と分類できる。ロッド型は結晶が円柱状の形状をしており、ロッド内部に

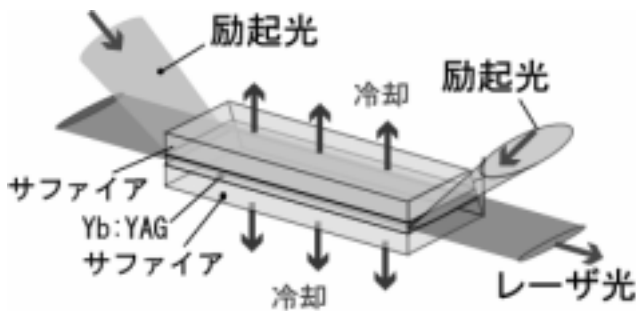


図1 薄型スラブレーザの概念図

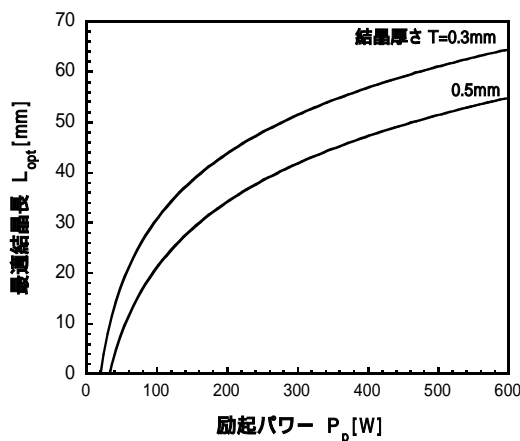


図2 最適結晶長の励起パワー依存性

温度分布が生じやすく結晶内部に軸対称の応力が生じる。この応力は光学的な異方性を引き起こすため、励起を強くすると次第に出力の上昇が制限され、レーザ光の質が低下して集光特性が悪くなる。この問題を克服するために考案されたのがスラブ型で、レーザ媒質は板状をしており、レーザ光がその内部を全反射しながら伝播することで、熱的レンズ効果、偏向解消などが除去可能である。ディスク型は非常に薄い結晶に対して励起光を多重パスさせることにより高吸収効率を実現し、高い変換効率と高ビーム品質、高出力特性が達成されているが、構造が複雑になる。そこで我々はスラブ型をさらに発展させた薄型スラブレーザの開発を行った。その概念図を図1に示す。励起方式は端面励起で、冷却は広い面積を有する上下方向から行う。他のスラブモデルの厚みが約 1mm 以上であるのに対して、我々のモデルは 0.5mm 以下であり、導波路構造とスラブ構造の両方の特徴を併せ

持つ。薄型スラブ構造の特徴として 薄スラブ形状、 低イオン濃度、 レーザ光と励起光のジグザグ状の伝播、などが挙げられる。 により準 4 準位レーザ媒質である Yb:YAG 結晶に不可欠な高密度励起が可能となり、高出力・高効率発振を実現し、また高利得増幅器としての利用が可能である。また、 の構造によりアスペクト比が大きいことにより広い表面積で冷却を行うことができ、ヒートシンクで挟むことにより一次元的な冷却を実現している。 により結晶内部の熱の発生が抑制され、さらに から熱レンズ効果の補正が容易に行える。以上の特徴から、高出力、高変換効率、高ビーム品質を兼ね備えたレーザ動作が期待できる。

3.2.2 結晶サイズの最適化

結晶の断面積はアライメントの容易さ、励起効率を高めること考慮して、励起用 LD を集光したときの集光径と同サイズ、すなわち、0.3~0.5mm×4mm(厚み×幅)とした。結晶の長さに関しては、準 4 準位媒質の場合、利得は励起による利得と下準位吸収による損失のバランスによって決まるが、不飽和単行利得が最大となるように設定し 4mm とした(図 2)。

3.2.3 CW 発振特性

実験に用いた結晶の概観を図 3 に示す。厚み 0.3~0.5mm の薄いスラブ状の Yb:YAG 結晶の両面からサファイアをディフュージョンボンディングすることにより励起光をその境界面において結晶内で全反射させ、閉じ込めるとともに、極めて薄い Yb:YAG 結晶の強度

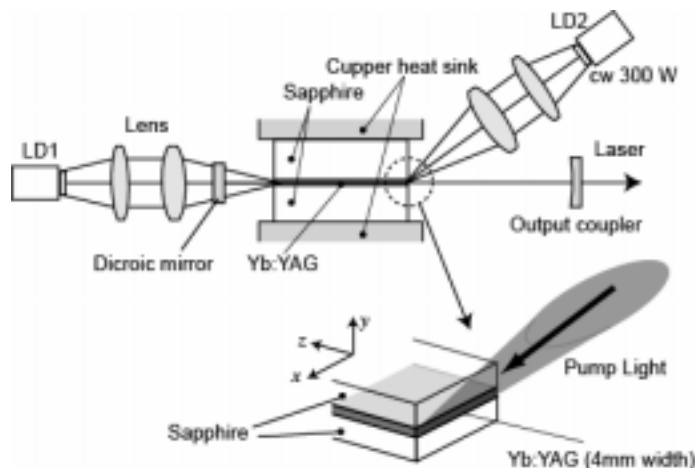


図 3 CW 発振器の共振器構成

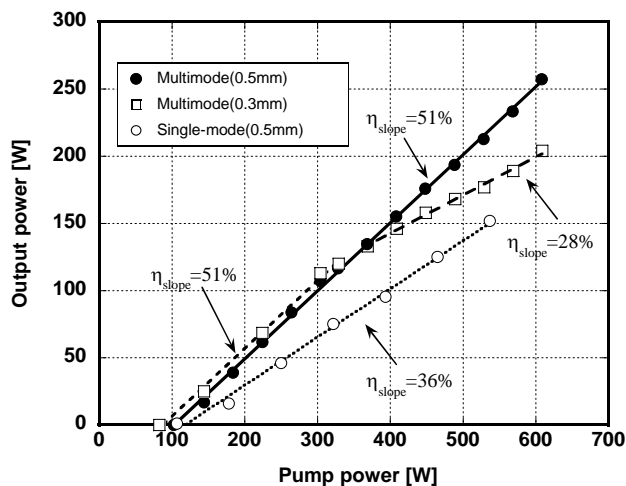


図 4 出力特性

を補強する構造となっている。CW 発振特性の実験構成を図 4 に示す。励起には結晶の両端面から 2 台のスタック型 LD を使い、1 台は後部鏡のダイクロイックミラー (940nm 全透過, 1030nm 全反射) を通してレーザ光と同一軸での端面励起で行い、もう 1 台はレーザ光軸に対し斜め方向から入射させ、結晶内部の励起光強度の均一化を図っている。冷却は結晶の広い面積側から水冷された銅のヒートシンクを用いて行った。共振器部にはミラー 2 枚(出力鏡: 曲率 250mm、透過率 25%) を用いて共振器長 60mm の共振器を構成し発振実験を行った。図 4 に CW 出力特性を示す。608W 励起で出力 257W(光-光変換効率 424%、スロープ効率 51%) のマルチモード発振を達成した。ビーム品質を示す

M^2 因子は厚さ方向 $M^2 = 7.5$ 、幅方向 $M^2 = 85$ であった。

CW 発振実験において高い発振出力と変換効率を達成したが、ビーム品質が不十分であったので、不安定共振器構成によるビーム品質の改善を行った。共振器長を 75mm とし、出力鏡に $\lambda = 1030\text{nm}$ HR の D 型ミラーを用いてそのミラーの横からレーザーを取り出す。この構成でのビーム品質 M^2 は厚さ方向 $M^2 = 2.0$ 、幅方向 $M^2 = 1.2$ と、改善された。また 536W の CW 励起での出力は 152W であった。

以上 CW 発振に関してまとめると、高平均出力、高変換効率、高ビーム品質の CW 発振器を実現するため、Yb:YAG 薄型スラブレーザの開発を行った。結晶の厚みを極めて薄くすることで、高密度励起と高冷却効率が同時に実現でき、高出力かつ高効率なレーザー発振が可能である。CW 発振特性の実験を行った結果、608W の CW 励起で、出力 257W (光-光変換効率 42%、スロープ効率 51%) のマルチモード発振を達成した。これは Yb:YAG のスラブレーザとして世界最高の変換効率である。また、不安定共振器を用いシングルモード発振を行った結果、536W 励起で最大出力 152W (スロープ効率 36%) が得られた。

3.3 ナノ秒パルスレーザーの動作特性

3.3.1 熱レンズ補償共振器の設計

一般的に固体レーザーでは高出力化に伴い結晶内部の発熱量は増加する。これにより熱レンズ効果が生じ、出力の不安定性やビーム品質の劣化を起こす。高出力レーザーの特に増幅動作時やパルス動作時においてビーム品質が悪い場合、局所的にエネルギー密度の高い箇所によって光学素子の破壊が起きる。本研究のような形状の結晶では、熱レンズ効果が非常に強く生じるため共振器を構成するとき、TEM₀₀ の基本モードのビーム径が小さくなりビーム品質の低下の原因となる。よってビーム品質の改善は重要となる。本研究では再生増幅器を検討しており、増幅実験する場合、種光の閉じ込め・取り出しを行うためにはポッケルセルのスイッチングの問題から 1m 程度の共振器長が必要となる。そのため共振器長の長い熱レンズ補償共振器を検討した。補償方法は熱レンズにより歪んだ波面を球面レンズ 1 枚を用いて TEM₀₀ のビーム径が結晶中で最大となるようにする。熱レンズ補償の設計には ABCD 光線行列を用いた。一般的な熱レンズの取り扱いには理想的な厚肉レンズを仮定するが、ここでは熱レンズ焦点距離が非常に短く、結晶長が長い結晶が温度分布に従う屈折率二乗分布媒質と仮定し設計を行った。また幅方向の熱レンズは厚さ方向の 1/10 と仮定した。

補償方式の特長として次の 3 つが上げられる。1) 一般のレーザーの場合、縦横(x 軸 y 軸)非対称な熱レンズ効果を示すため片軸ずつの補償が必要となるが、本構成では 1 枚の球面レンズで厚さ方向、幅方向の熱レンズを補償する簡単な共振器構成となっている。2) 熱

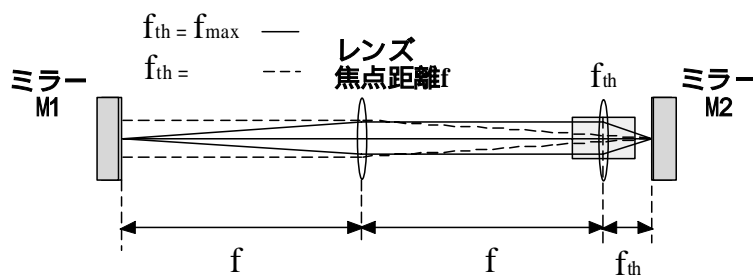


図5 熱レンズ補償共振器構成

レンズの強い結晶厚さ方向については一次の歪みである屈折を補償するため補償用レンズにより結晶の中心で 1 対 1 に結像する条件となっている。これより熱レンズによる出力の不安定性を緩和させることが可能であると考えられる。3) 設計は使用す

る球面レンズの焦点距離によらないため共振器長の増減を焦点距離を変えることで自由に調整できる。これにより再生増幅器に適した共振器長を容易に得ることができる。

共振器中での各位置における厚さ方向、幅方向のビームトレースを図 6 に示す。使用したレンズの焦点距離は 500mm であり、共振器長は 1050mm である。また、図 7 に M2 ミラーを動かしたときの各励起パワーに対するビーム直径を、図 8 にレンズを動かしたときの各励起パワーに対するビーム直径を示す。断面積 1mm×1mm で端面をプリスターカットされた結晶の場合、レーザー光に対する有効径は厚さ方向で 1mm、幅方向で 0.554mm となる。ビーム径は $1/e^2$ で表しており、設計ではこの有効径の 8 割程度の大きさとなるようにした。図 6 では厚さ方向のビーム径を吸収励起パワー 170W 付近、幅方向のビーム径は厚さ方向の熱レンズ焦点距離の 1/10 としたため 17W 付近のビーム径に対応する。これより図 7 からミラー 2 を動かした場合は厚さ方向のビーム径のみが、また図 8 からレンズを動かした場合は幅方向のビーム径のみが変化することがわかる。よって実験では設計と熱レンズ焦点距離が異なる場合でもこれらの素子を調節することで補償が可能となる。

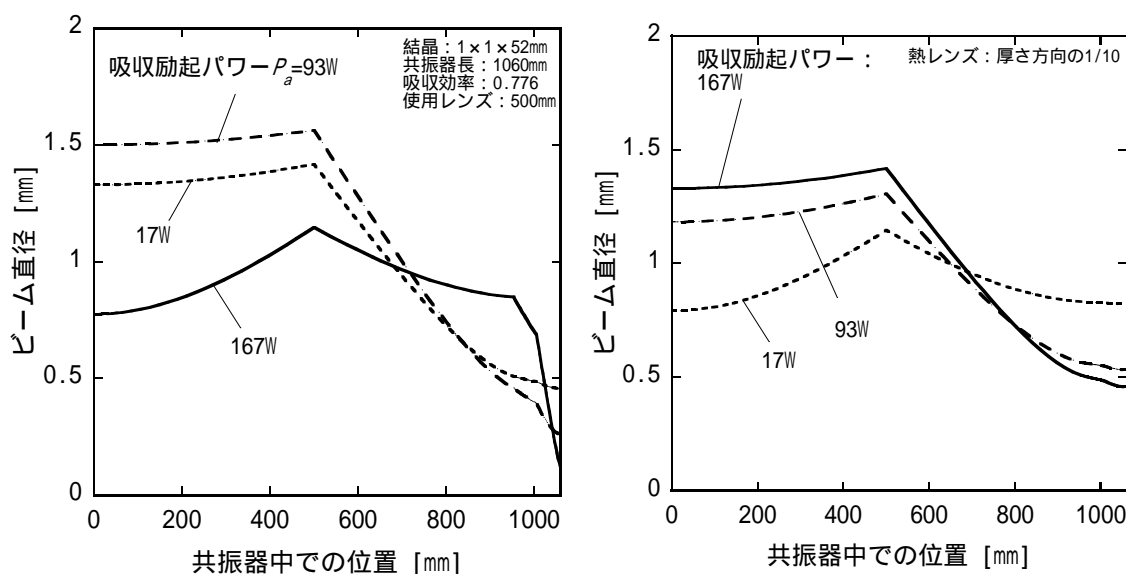


図 6 共振器中での各位置における厚さ方向、幅方向のビームトレース

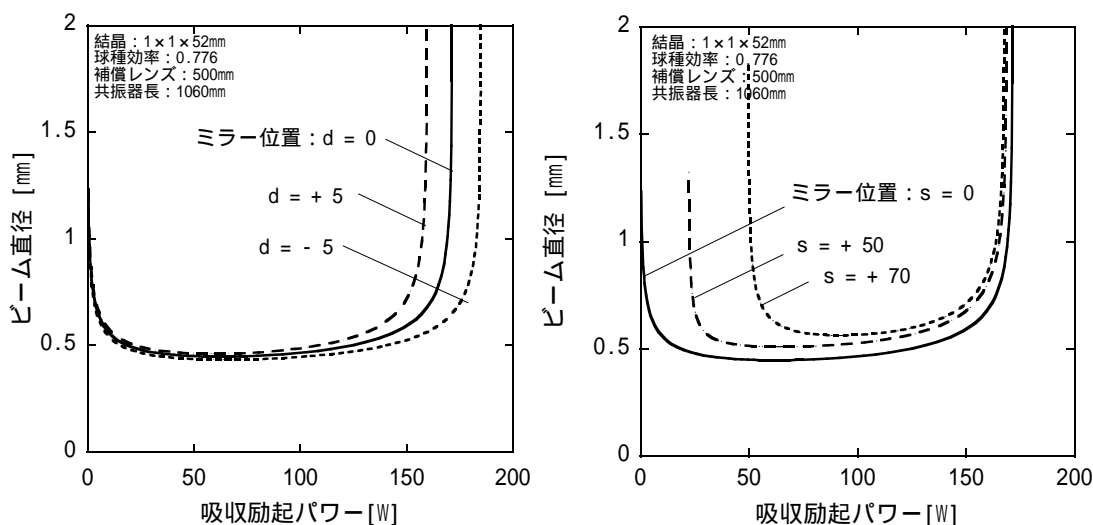


図 7 ミラー 2 位置のビーム径の励起パワー依存性

図 8 レンズ位置のビーム径の励起パワー依存性

3.3.2 キャビティダンプ動作法によるナノ秒パルス動作

ナノ秒パルス発生の代表的な方式としてQスイッチ動作があげられる。これは共振器の良好指数であるQ値を短時間に切り替えることにより短くて強力なパルス出力を得る方式である。Qスイッチを起こすためには回転ミラー（または回転プリズム）や過飽和吸収体があるが、本研究では光スイッチを用いた。光スイッチ素子には電気光学素子(EO)と音響光学素子(AO)がある。AO素子は超音波を用いて変更の制御を行い、MHzという高繰り返しで動作が可能となる。しかし回折効率が最大で90%程度と効率が悪く、またスイッチング速度を上げるためにビーム径を素子に集光する必要がある。EO素子を用いた場合は繰り返し周波数が数100kHzと早く、取り出し効率も高いという利点がある。本構成では繰り返し周波数100kHzを考えており、立ち上がりが早く、効率が高くなるEO素子を用い、キャビティダンプ動作を行った。

キャビティダンプ動作法はQスイッチ法と同様にQ値を短時間に切り替えることにより短くて強力なパルス出力を得る方式である。異なる点として、Qスイッチ動作では共振器鏡に出力鏡をもち、利得と共振器損失のバランスで取り出し効率の最適化を行っている。これに対しキャビティダンプ動作は全反射鏡対による共振器構成をもつ。急激に立ち上がる内部エネルギーはEO素子をスイッチングすることで出力鏡を100%から0%まで変化させ、その全てを取り出すことが可能となる。キャビティダンプ動作の利点としては、1. 内部エネルギーをすべて取り出すため高効率動作ができ、また共振器内素子のダメージの軽減となる。2. パルス幅は共振器の損失によらず、共振器長に依存するため短くなる。また、キャビティダンプモードロックや超短パルスレーザ増幅器（再生増幅器）が上げられる。

パルス動作におけるエネルギーの蓄積率は繰り返し周波数に依存する。ここでは繰り返し周波数における蓄積率を考慮し、パルス動作における蓄積エネルギー、蓄積効率を考える。図9に蓄積エネルギーの、図10に蓄積効率の繰り返し周波数依存性を示す。蓄積エネルギーは上準位寿命960 μ sの逆数である繰り返し周波数1kHzにおいて65%まで回復する。パルス動作における蓄積効率では励起によるエネルギーを効率よく取り出すという点で高繰り返し動作がよい。本構成では10kHzから100kHzまで効率は常に最大となり、高繰り返し動作での効率の低下がないといえる。

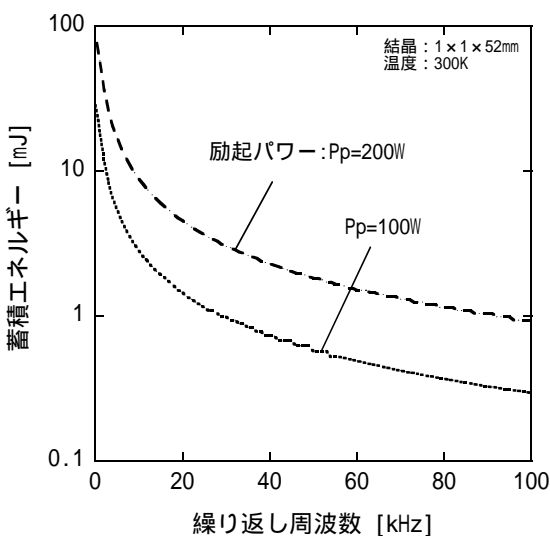


図9 蓄積エネルギーの繰り返し周波数依存性

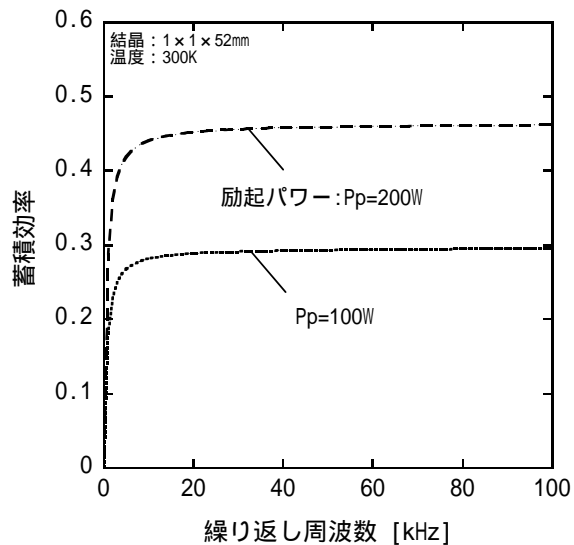


図10 蓄積効率の繰り返し周波数依存性

3.3.3 ナノ秒パルス動作特性

図 11 にキャビティダンパ動作の構成図を示す。共振器は熱レンズ補償の共構成を用いた。ポッケルセルによる偏光の回転で TFP が出力鏡となるため共振器ミラーには HR ミラーを使用している。TFP の特性は P 偏光の透過率 93%、S 偏光の透過率 0.05% であり、S 偏光

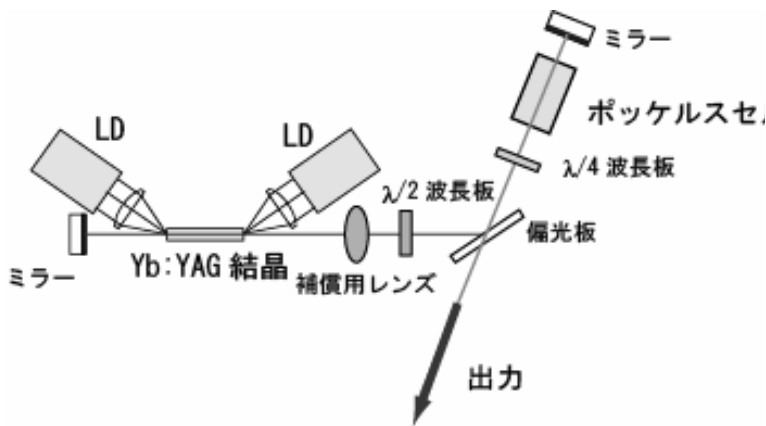


図 11 キャビティダンパ動作の実験構成図

の反射率は 99.5% と見積もれる。よって共振器損失の少ない S 偏光で共振器を構成する反射型共振器の構成を採用した。またポッケルセルには $4 \times 4 \times 20\text{mm}$ の RTP 結晶を用いた。RTP は他の電気光学素子に対して動作電圧が半波長電圧で 1.7kV 程度と低く、破壊しきい値は $600\text{MW}/\text{cm}^2@10\text{ns}$ と高い。

また、結晶は 2 つの結晶軸を対角に配置し光を透過させるため複屈折が補償できる構成となっている。また $1/4$ 波長板を用いることでポッケルセルは $1/4$ 波長電圧で動作でき、安定動作が可能となる。共振器長は 850mm とした。

本構成で高効率動作を行うためには、結晶の利得と共振器損失が釣り合うまで発生した自然放光が共振器に閉じ込められる必要がある。この閉じ込め時間はポッケルセルにかかる電圧の時間幅に比例する。そこでまず、低出力動作でパルス動作を行い、ポッケルセルにかかる電圧の時間幅を変えたときの平均出力の変化を測定した。図 12 にパス回数に対する平均出力依存性を示す。パス回数とは媒質を通過した回数を指し、(ポッケルセルにかかる電圧の時間幅)/(共振器の光路長)で求めた。実験の条件として吸収励起パワー 51.7W、繰り返し周波数 10kHz で行った。実験の結果、パス回数 236 回(時間幅: 700ns)まで平均出力は増加し、その後低下していった。これは 236 回パス後に利得と共振器損失が釣り合い、その後は利得が枯渇した状態で共振器損失にさらされるため出力が低下したと考えられる。

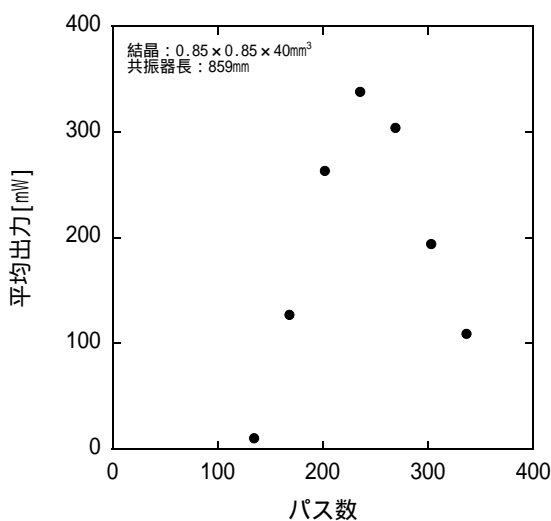


図 12 パス数に対する平均出力依存性

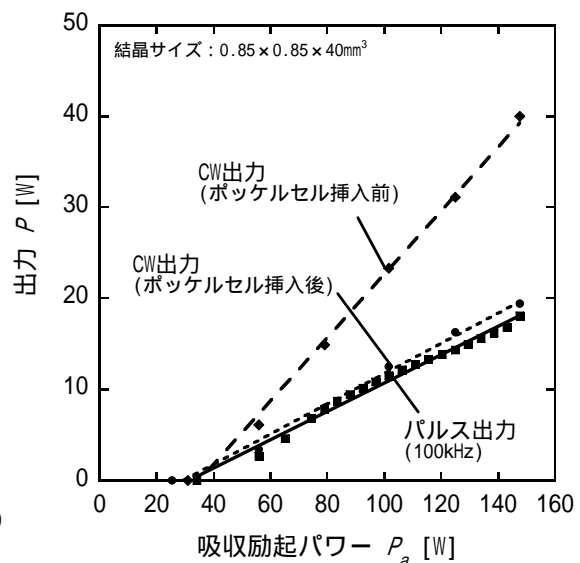


図 13 入出力特性

次にパス回数 236 回の時間幅で励起パワーを上げていった。図 13 に繰り返し周波数 100kHz でのキャビティダンプ動作の入出力特性を示す。また同図には RTP ポッケルセルを挿入前の CW 出力と RTP ポッケルセル挿入後の CW 出力も示した。結果より繰り返し周波数 100kHz で最大出力 18.1W、パルス幅 11ns、スロープ効率 26.4%、光 - 光変換効率 12.3% を得た。ポッケルセル挿入前の CW 出力は 19.4W のためパルスへの変換効率は 93% となり、ポッケルセルのスイッチングによる損失は小さいことが確認された。しかしポッケルセル挿入前の CW 出力が 40W に対し、挿入後の CW 出力が 19.4W と低下した。出力の低下率は 51.5% と大きく、ここでの効率の低下が問題となった。

この原因として RTP ポッケルセルの 1) 透過率、2) 複屈折損失があげられる。2) 熱複屈折損失は結晶の場合と同様にキャビティダンプ動作構成において大きな損失となる。透過率は 96% 以上でありそれほど大きい損失ではなかった。次に熱複屈折の測定を行った。光源は波長 1030nm のものを用いた。この実験結果を図 14 に示す。入射パワーが増加するに従って熱複屈折損失は増加していき、入射パワー 32.6W のとき RTP の損失は 4.3% であった。計算による最適出力透過率は 27% 程度であり、実際に実験でポッケルセルがさらされるパワーは出力 40W のとき 148W 程度であると見積れる。よって実際に RTP ポッケルセルの挿入によって受ける共振器内部損失は実験値の 4.3% よりも大きくなると予想される。

図 15 に共振器内部損失を変えたときの出力特性の計算値を示す。条件として吸収励起パワー 148W でモードマッチング効率は 50% とした。出力鏡の透過率は 73% とし、図中の共振器損失はこれ以外の共振器損失を表している。ポッケルセル挿入前の共振器 1 パスでの透過率は 93.1% となる。RTP ポッケルセルを挿入した場合、透過損失 4% と熱複屈折損失 4.3% 以上が共振器損失に加わる。これより損失によって出力が大きく減少することが確認された。

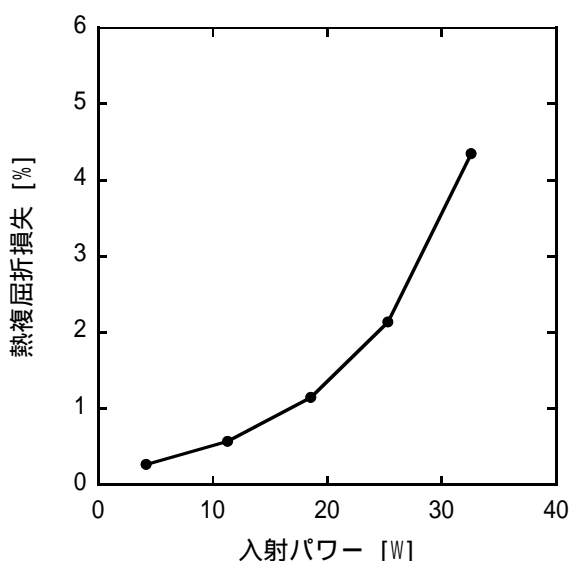


図 14 RTP ポッケルセルの熱複屈折損失

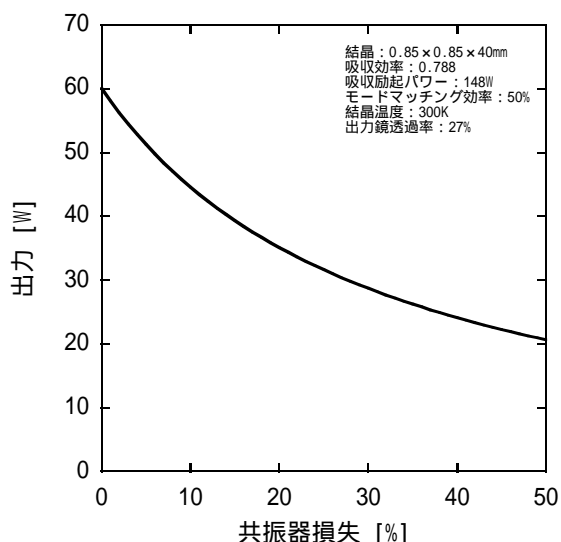


図 15 共振器内部損失を変えたときの入出力特性

以上ナノ秒動作に関してまとめると、キャビティダンプ動作の結果として繰り返し周波数 100kHz で最大出力 18.1W、パルス幅 11ns、スロープ効率 26.4%、光 - 光変換効率 12.3% を得た。ここでの問題点として RTP ポッケルセルの挿入による効率の低下が上げられるが、これは RTP ポッケルセルの熱複屈折損失によるものであった。実験では入射パワー 32.6W のとき RTP の熱複屈折損失は 4.3% と測定されたが、共振器内ではさらに大きい損失の可能性もある。そこでポッケルセルを熱複屈折損失の小さい結晶に変えて実験を行った。そ

の結果、RTP ポッケルセルでの出力の低下率が 51.5%であったのに対し BBO ポッケルセルでは 6.2%と小さく効率は大きく向上した。今後、この状態でキャビティダンピング動作を行えば 30W 以上の出力が期待される。

4. 研究目的と内容 (フェーズ)

パルス幅がフェムト秒 ($10^{-15} \sim 10^{-12}$ s) 領域の超短パルスレーザーは、基礎的な研究分野に応用されるだけでなく、超微細加工や機能性薄膜の創製など半導体や電子産業、機械産業の基盤的な生産技術に利用されつつある。また、超短パルスレーザーを用いた生体・医療診断システムは、装置の小型化も容易で可搬性の高いシステムとして期待されている。しかし、従来の超短パルスレーザーとして代表的なチタンサファイアレーザーは効率が低く装置も大型で実用性に乏しい。また、超短パルス半導体レーザー(LD)やファイバレーザーはパルスのエネルギーが小さくノイズも大きいため、実用分野が限られる。

そこで本研究では、LD による直接励起が可能で、量子効率が高く蛍光スペクトル幅が広いために、効率よく超短パルスを小型に得ることが可能なイッテルビウムレーザー材料を用い、小型超短パルス固体レーザーの実現を目標とした。また、開発されたレーザーの一部は本プロジェクトの主題である高出力超短パルスレーザーの種光として用いた。

フェーズ で開発した増幅モジュールを用いて、超短パルス増幅器を開発し、フェムト秒レーザー発振増幅システムを構築する。そのために必要な、主発振器、パルス伸張圧縮技術、再生増幅システムを開発する。目標はパルス平均出力 20~50W, ビーム品質 TEM₀₀ モード, パルス幅 数 100 fs を達成する。また、MOPA へ搭載するための組み込み型発振器を開発する。特性の達成目標は平均出力 10mW、TEM₀₀ モード、パルス幅数 100fs である。

5. 研究成果 (フェーズ)

5.1 超短パルス発振器の開発

5.1.1 超短パルス発振器の構成と動作特性

超短パルス出力の安定化のために、高い非線形係数を持つ媒質を用いたカーレンズモード同期を行う。従来のモード同期は利得媒質のカーレンズ効果を利用しているため、レーザーの高効率化とモード同期の安定化を同時に行うことは困難であったが、本方式により利得媒質とモード同期媒質を分離できるため、それぞれの最適化を行うことができる。また、利得媒質より、一桁高い非線形係数を持つ媒質を用いることで、容易にモード同期に必要なカーレンズ効果を得ることができ、安定化につながる。

図 16 に製作したレーザーの構成を示す。励起にはマルチモード・シングルエミッタ LD (OSRAM 社 : エミッタ長 : $1 \times 200 \mu\text{m}$ 、ビーム品質値 $M^2 : 1 \times 30$) を用い、高密度励起を行

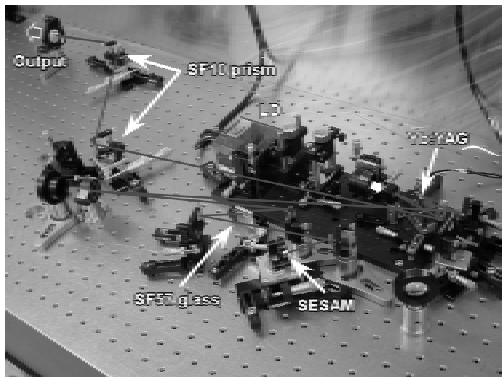


図 16 SESAM 併用による Kerr レンズモード同期共振器の外観

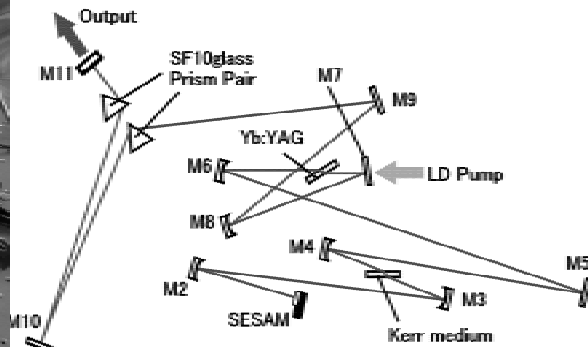


図 17 非線形ガラスと SESAM を併用したモード同期レーザーの構成

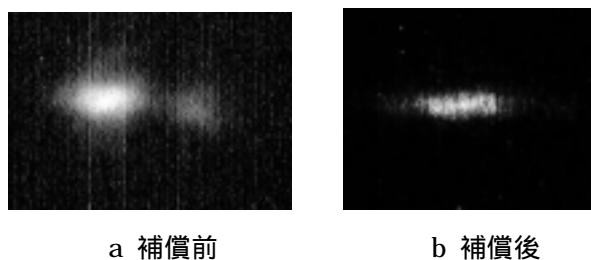


図 18 レーザ結晶でのレーザ光の横モード形状

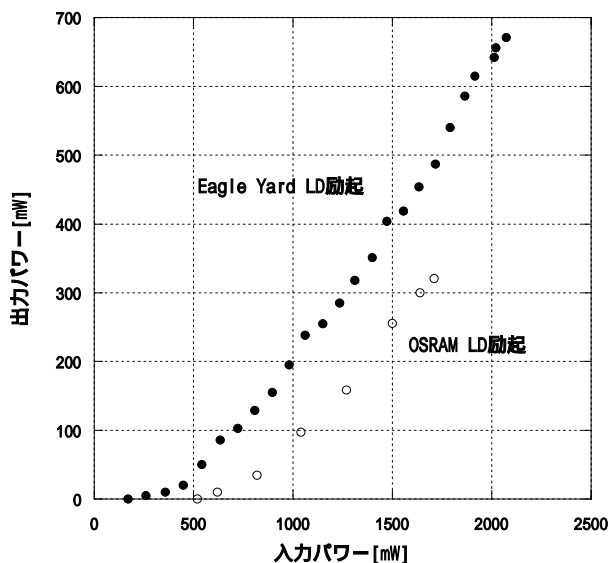


図 19 CW 入出力特性の比較(出力鏡透過率 10%)

うために楕円形状(50×200 μm)に集光した。このときの集光強度は 20 kW/cm²であった。楕円に励起を行ったためにマルチモード発振がし易くなってしまった(図 18 . a)。そこで、共振器中にシリンダカルミラーを挿入し、レーザ光の TEM₀₀ モードを励起光の形状に合わせた楕円形状に調整した(図 18 . b)。挿入前の水平方向の M² 値は 6 であったが、シリンダカルミラーを挿入することにより M² 値を 1.2 に改善することができた。

この構成において、モード同期のパルスの発生を確認した。出力されたパルスの繰り返し周波数が 74 MHz であり、共振器長 2 m のパルス繰り返し周波数に対応していた。また、こ

のときの発振スペクトル幅(FWHM)は 2.0 nm であり、フーリエ変換限界を仮定した場合パルス幅は 550 fs になる。出力鏡の反射率 R_{out} が 95 % のとき、最大平均出力 45 mW であった。また、このとき SF57 ガラスの共振器内部での位置を移動し、SF57 ガラスへのレーザ光の集光サイズを変えることによって、CW 動作からモード同期動作へ移行した。このことから、SF57 ガラスによるカーレンズ効果がこのモード同期を強く支配していることがわかる。さらに、SF57 ガラスのみを用いた場合においてもモード同期が確認された。

また、図 17 の構成において出力鏡透過率 1% のときに、平均出力 5 mW、中心波長 1031nm で発振スペクトル幅 3.0 nm (FWHM)、パルス幅 410 fs であった。

5.1.2 組込用超短パルス Yb:YAG レーザの開発

フェーズ 1 における発振器に関する研究成果を受けて、MOPA へ組み込むために必要な組込型発振器の研究開発を行った。フェーズ 1 では結晶のウェッジ角不足と AR コーティングによる残留反射光によって引き起こされるエタロン効果が問題であったが、結晶に十分な角度のウェッジを付けこれらの問題を解決した。平均出力は 10mW、パルス幅は 3.3ps (自己相関波形を図 21 に示す)であった。

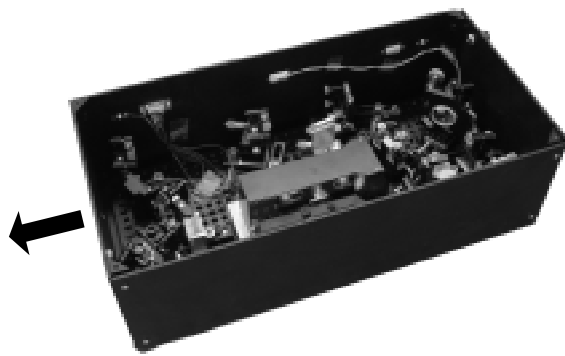


図 20 組込型発振器

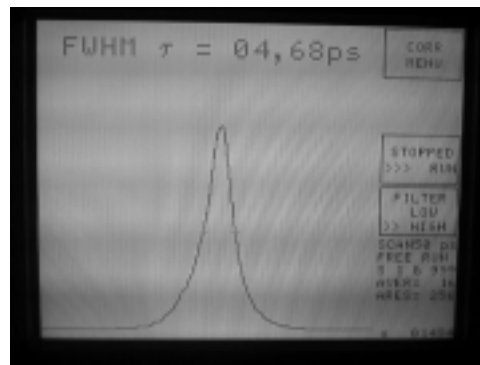


図 21 自己相関波形

5.2 MOPA型Yb:YAG超短パルスレーザの開発

5.2.1 再生増幅器の動作設計

発振器からのパルスを増幅する方法として、多段増幅方式、マルチパス増幅方式、再生増幅方式などがあるが、多段増幅方式では増幅器1回パスのみの構成のためシステム自体は非常に簡単な構成となるが、入力パルスの強度が飽和強度に比べ弱すぎると、最初の利得媒質などでは蓄積されたエネルギーを取りきれないといった欠点があり、そのため複数の増幅器を通過させる方式をとるがシステム自体が大きくなり、また全体での抽出効率を高くすることができない。マルチパス増幅方式や再生増幅方式では、レーザ光を増幅器内で繰り返し通過させることで増幅器内に蓄積されたエネルギーを効率良く取り出すことが可能である。マルチパス増幅方式では多段増幅方式に比べ増幅器のパス回数を増やすことができる。しかし、パス回数は増幅器の構成で決定されるため幾何学的に限界があり、利得が低い場合、または入力パルスの強度が飽和強度に比べ弱すぎると蓄積されたエネルギーを取りきれないといった欠点を有している。再生増幅方式では、パス回数はポッケルセルの印加電圧を時間的に制御することによって決定され、構成は共振器構成である。そのため入力パルスの強度が飽和強度に対し弱い場合でも増幅器内に蓄積されたエネルギーを効率良く取り出すことが可能である。一般に、増幅器において蓄積されたエネルギーを効率よく取り出せるかは媒質の利得と入射パルスの強度に依存する。マルチパス増幅方式や再生増幅方式では増幅媒質の利得が高い方が高効率動作となるが、それと共に寄生発振などの問題が起こってくるためその抑制が重要となる。また ASE 増幅によるノイズ発生が起こるためこの対策も必要となる。

5.2.2 取り出し効率の最適化

増幅器としての効率を考える場合、(1) 蓄積効率 (2) 取り出し効率の2つを考える必要がある。取り出し効率に関しては増幅媒質の持つ初期の利得に対して入射エネルギーと増幅媒質を通過するパス回数によって決定される。再生増幅器ではこのパス回数を任意にかえることができ、最適化を行うことができる。図 22 にパス回数に対する出射エネルギーを、図 23 にパス回数に対する取り出し効率の計算結果を示す。計算の条件として結晶サイズは $1 \times 1 \times 52\text{mm}$ 、結晶温度は 300K 、共振器のシングルパス透過率を 88.4% 、種光の強度を $1\text{mJ}/\text{cm}^2$ 、繰り返し周波数を 100kHz とした。計算の結果、励起パワー 200W の場合、最適パス回数が 15 回のとき最大出力エネルギーが 0.76mJ 、取り出し効率が 81.4% であり、増

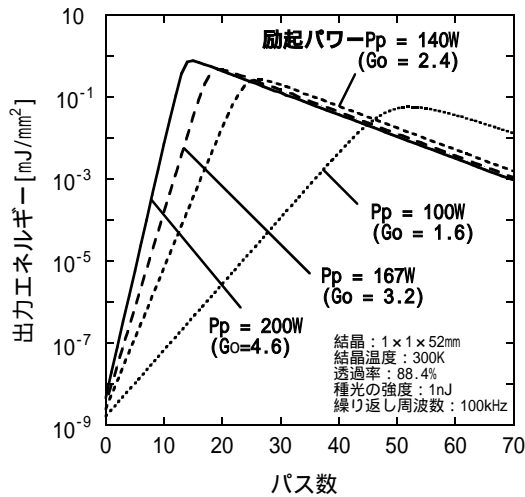


図 22 RTP ポツケルセルの熱複屈折損失

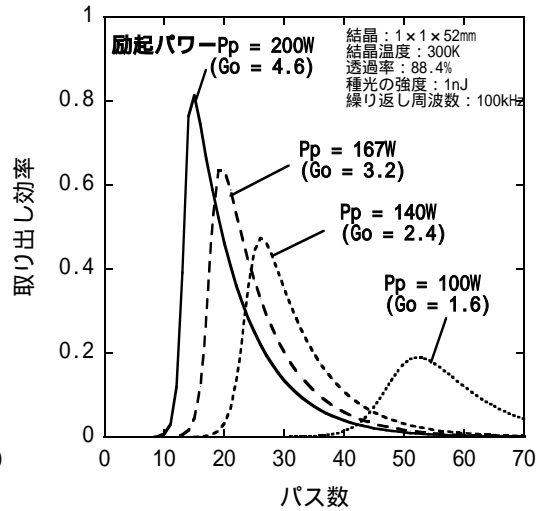


図 23 入出力特性の共振器内部損失依存性

幅率は 7.6×10^8 倍が得られた。これより 100kHz の高繰り返し動作においても高効率動作が可能であることが確認された。ただし計算上で利得は不飽和単行利得を使用しており、200W 励起では利得 4.7 倍となる。実験では 3.3 章で示したように飽和が起きているため利得は 3.2 倍となっており、これは 167W 励起での不飽和単行利得とほぼ一致する。このことから現状で得られる値はパス回数 20 回するとき最大出力エネルギーが 0.46mJ、取り出し効率が 64%程度となる。

一般に増幅器では高エネルギーが蓄えられており、自然放出光の強度は高くなる。再生増幅器構成ではこの ASE 強度が高い場合、キャビティダンブ動作による自己発振を行い増幅動作ができなくなる。そのため自然放出光の強度に対して種光の強度が高い必要がある。そこで種光の強度を決定するため自然放出光の強度の計算を行った。仮定として増幅中のパルスのバンド幅 $\sim 2\text{ns}$ とした。立体角は端面から出る光の中で増幅に寄与する光のみを考えると、回折広がり程度として $d = 2 / (n^2 S)$ と表せる。200W 励起パワーのとき結晶温度 300K で 654pJ であった。蓄積エネルギーの蓄積率を考慮すると繰り返し周波数 10kHz では 64.7pJ、100kHz では 6.5pJ となる。よって発振器は 65pJ 以上の出力エネルギーが必要となる。

5.2.3 Yb:YAG 超短パルスレーザシステムの動作特性

本システムに構成を図 24 に示す。発振器と増幅器それぞれ 1 台からなる一般的な MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) 構成で、フェムト秒レーザの増幅であるため CPA 法を用いている。発振器からのパルス列をストレッチャー (グレーティング) で伸張し、再生増幅器で増幅後、再び圧縮して出力し、超短パルス出力を得る。発振器は利得部に Yb:YAG のマイクロチップ、モードロッカーに過飽和吸収ミラー (SESAM) を用いた小型 (30cm × 20cm × 10cm) 発振器であり、現在、出力 9.7mW、ビーム品質: $M^2 = 1.0 \times 1.5$ (水平軸 × 垂直軸)、パルス繰り返し周波数 114MHz、パルスエネルギー 85pJ の出力が得られている。図 26 に発振器から出力されたパルスの相関波形を示す。半値全幅 160us よりパルス幅は 3.3ps と見積もれる。現在、SESAM の製造不良によりピコ秒動作に留まっているが、設計では 500fs 以下のパルスが得られる構造であり SESAM の交換でフェムト秒発振は十分可能である。パルス伸張部は一枚のグレーティングとレンズおよび折り返しミラーから成り、発振器からのビームのパルス幅を 200 倍に伸張する。透過率の測定で

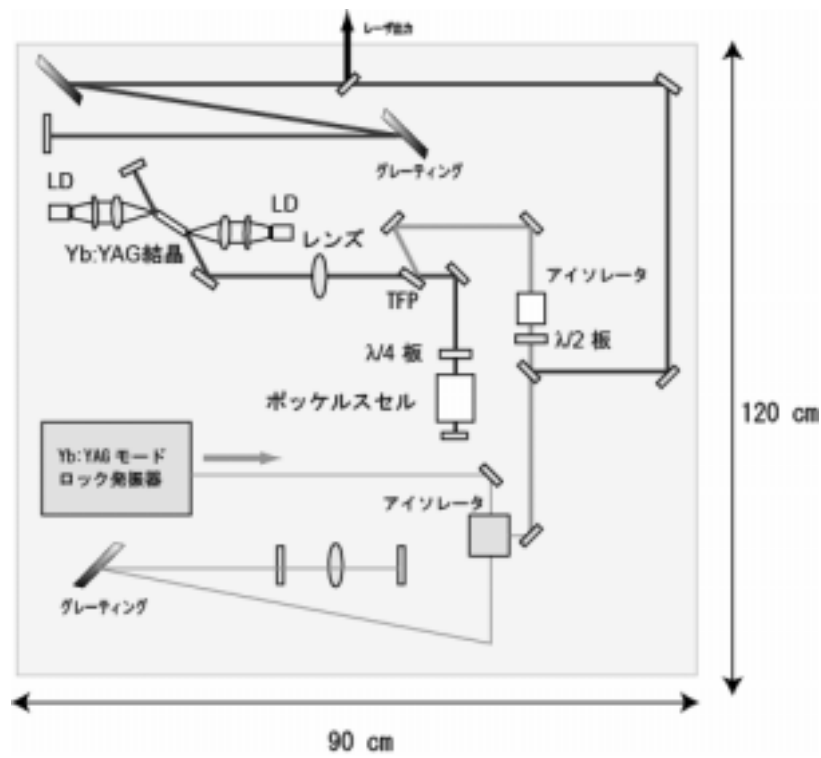


図 24 Yb:YAG 超短パルスレーザの構成図

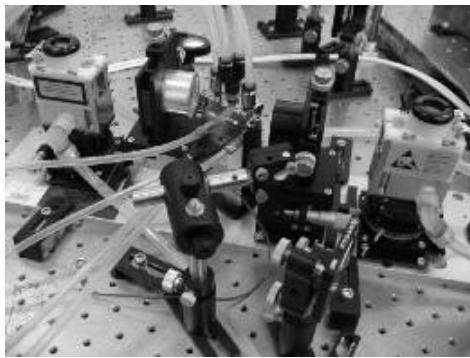


図 25 増幅モジュール拡大写真

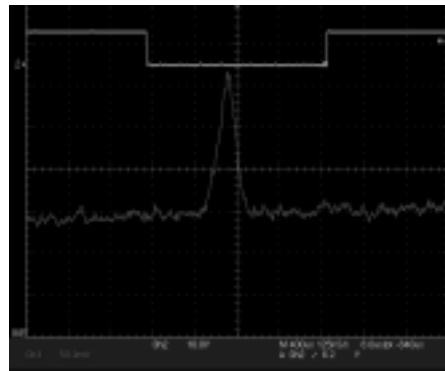


図 26 発振器からのパルスの相関波形

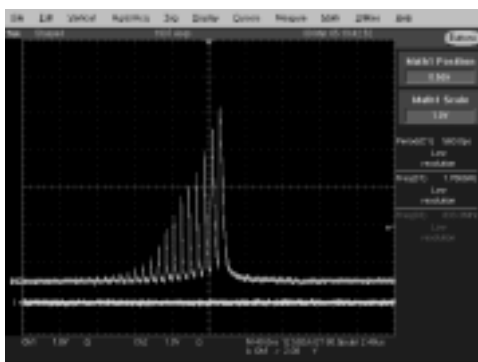


図 27 パルス増幅の様子

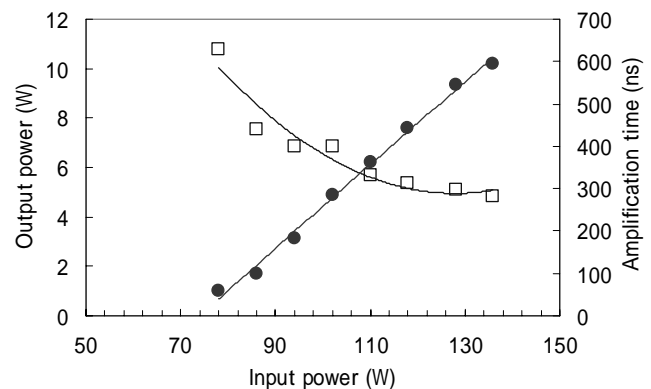


図 28 増幅器内のパルストラップ時間

は 78.3%であった。

伸張されたパルスの増幅は、増幅モジュール (図 27) TFP(Thin film polarizer)、 $\lambda/4$ 波長板、BBOポッケルスセルで構成される透過型の再生増幅器を用いた。増幅モジュールには断面 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 、長さ 42 mm 、ドーピング濃度 0.7 at\% の微細ロッド型セラミッ

ク Yb:YAG 結晶を用い、端面での光学的損傷を防止するためそれぞれの端面に 5 mm のノンドープの YAG 結晶を接合した。パルスはブリュスター角度にカットングされた端面に入射され、結晶内をストレートに伝搬する。励起は LD は波長 940nm の両軸コリメー

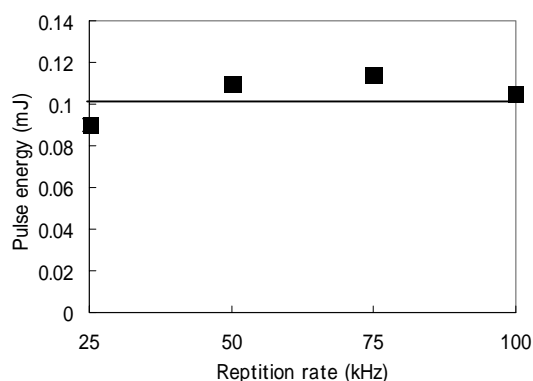
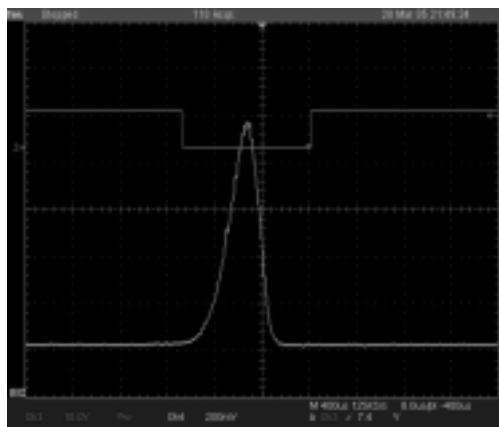


図 29 圧縮器通過後のパルスの相関波 図 30 パルスエネルギーの繰り返し周波数依存性

トのスタック型 LD で行い、最大励起パワーはそれぞれ 140W (合計 280W) である。増幅用共振器は長さ 1100mm で、共振器内には熱レンズ補償用のレンズ ($f=500\text{mm}$) が一枚挿入されており、これにより共振器内の発振モードを調節し、 TEM_{00} かつ結晶内のモードボリュームが最大となる増幅を行っている。また、シングルパスの利得を測定したところ 3.1 といった結果が得られた。図 27 に共振器内でのパルス増幅の様子を示す。共振器内でのパルス増幅と共振器からのパルスの切り出しが問題なくに行われているが確認できる。

共振器内のパルスエネルギーを効率よく取り出すために、パルストラップ時間と出力の関係性を調べた。その結果を図 29 にしめす。このグラフから 10W 出力を得るためには 281ns のトラップ時間が最適であることがわかる。また、ピコ秒領域での増幅であり、ゲインナロイングの問題は小さいと考えられるが、増幅前後でのパルスのスペクトル幅を測定を行った。結果増幅前のスペクトル幅が 1.6nm であったのに対して、増幅後は 1.4nm であり、予想通りパルス幅に対する影響は小さいと考えられる。

再生増幅器で増幅されたパルスは 1 対のグレーティング対からなるパルス圧縮器による再度圧縮を行った。圧縮後の出力ビームの相関波形を図 29 に示す。半値全幅 300us よりパルス幅は 6.2ps と見積もれる。発振器からのパルス幅の 2 倍程度になっているのは、スペクトルがわずかではあるが狭まっていることと、圧縮器のアライメントエラーと考えられるため、引き続き調整を行っている。最終出力のパルスエネルギーの繰り返し周波数依存性を図 30 に繰り返し周波数 100kHz 動作時の入出力特性を図 31 に示す。最大平均出力 10.1W、パルス幅 6.2ps、パルスエネルギー 0.1mJ、ビーム拡がり角 0.1mrad のパルス出力が得られた。最後に、本レーザーは (株) メガオプトの協力によりパッケージングが行われたが、その外観写真を図 32 に示す。

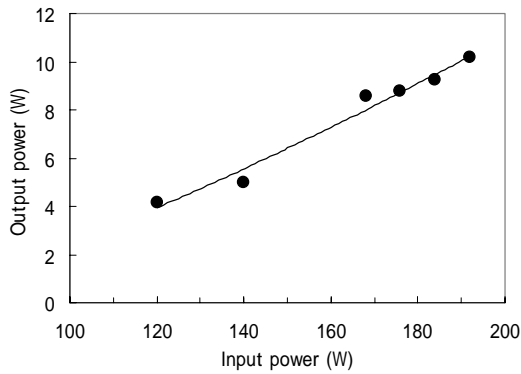


図 31 繰り返し周波数 100kHz 動作時の入出力特性

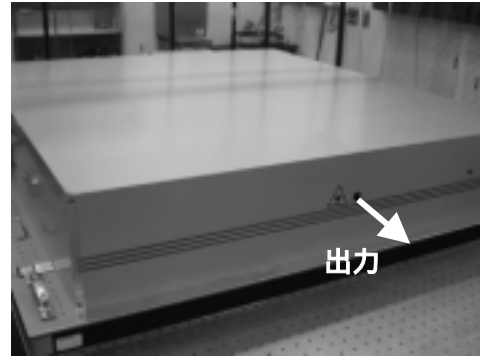


図 32 Yb:YAG 超短パルスレーザの外観

以上超短パルス発振についてまとめると加工応用を主な目的として、半導体レーザ励起 MOPA 型 Yb:YAG 超短パルスレーザの開発を行った。本システムは、Yb:YAG 結晶を用いたモードロック発振器(平均出力 10mW、パルス幅は 3ps)および再生増幅器からなる MOPA で構成され、チャープパルス増幅法により増幅する。平均出力 10.1W、繰り返し周波数 100kHz、エネルギー 0.1mJ、パルス幅 6.2ps の出力を達成した。

現在、ファイバレーザ等のフェムト秒発振器を用い、増幅後のパルス幅をフェムト秒にする実験を進めている。

5.3 フェーズ、での研究成果のまとめ

高平均出力、高変換効率、高ビーム品質の CW 発振器を実現するため、Yb:YAG 薄型スラブラーザの開発を行った。結晶の厚みを極めて薄くすることで、高密度励起と高冷却効率が同時に実現でき、高出力かつ高効率なレーザ発振が可能である。

小型・高ビーム品質 CW・ナノ秒パルス Yb:YAG レーザの開発(フェーズ)

CW 発振特性の実験を行った結果、608W の CW 励起で、出力 257W (光-光変換効率 42%、スロープ効率 51%) のマルチモード発振を達成した。これは Yb:YAG のスラブラーザとして世界最高の変換効率である。また、不安定共振器を用いシングルモード発振を行った結果、536W 励起で最大出力 152W (スロープ効率 36%) が得られた。

微細ロッド型 Yb:YAG 増幅モジュールを開発し、Qスイッチ方式によるナノ秒パルス Yb:YAG レーザを開発した。繰り返し周波数 100kHz で最大出力 18.1W、パルス幅 11ns、スロープ効率 26.4%、光-光変換効率 12.3%を達成した。

Yb:YAG モードロック超短パルスレーザ発振器の開発(フェーズ)

Yb:YAG 超短パルスレーザシステムに用いるために、超短パルス Yb:YAG モード同期発振器を研究開発した。非線形カー効果材料と可飽和吸収体を組み合わせ、パルス幅 410fs、中心波長 1031nm の安定な超短パルス Yb:YAG レーザを実現した。

MOPA 搭載の必要性から小型化を行い平均出力 10mW、パルス幅 3.3ps を得た。

高出力 MOPA 型超短パルス Yb:YAG レーザシステムの開発

フェーズで開発した微細スラブ型 Yb:YAG 増幅モジュールとフェーズで開発した組込型発振器で構成される MOPA 型 Yb:YAG 超短パルスレーザシステムを開発した。平均出力 10.1W、繰り返し周波数 100kHz、エネルギー 0.1mJ、パルス幅 6.2ps の

出力を達成した。この成果は超短パルス出力が可能な市販レーザと比較すると以下の特長があげられる。ファイバレーザに比べて1パルスあたりのエネルギーが大きく、これは典型的なファイバレーザと比較して10倍である。また、チタンサファイアレーザに比べて繰り返し周波数が大きく、典型的なファイバレーザと比較して10倍あり、平均出力に関してはファイバレーザ、チタンサファイアレーザの2～10倍である。しかしながらパルス幅に関してはピコ秒のオーダーであり、今後主発振器のフェムト秒化を進めることで、MOPAの最終出力をフェムト秒にする予定である。また、出力に関しては結晶の光学的損傷が上限値を決定しているため、結晶周辺のダスト等の環境対策を施すことにより20～30Wは可能であると考えられる。

6. 今後（フェーズ）の計画

今後の課題としては、

(1) 組込型発振器のフェムト秒パルス化

現在得られている最短のパルス幅は3.3psであるが、この原因は、発振器の小型化に伴う共振器に対する制約、およびSESAMの品質の不安定性によるもので、今後SESAMの安定化および共振器の小型化を行うことによりフェムト秒発振を試みる。

(2) MOPA型超短パルス Yb:YAG レーザの短パルス化と高出力化

発振器のパルス幅をフェムト秒に調整することで、システムの最終的な出力のフェムト秒化を行う。また現在最大平均出力10Wが得られているが、CW発振、Qスイッチ動作時のデータから微細ロッドでは20～30W、薄型スラブではさらなる高出力化が期待できるため、そのための結晶のダスト対策、共振器設計を行いさらなる高出力化(20～30W)を目指す。

7. 特記事項

・特許に関しては以下のものが申請中である。

- ・固体レーザ装置「微細スラブ型レーザ」 特許番号200385604
- ・固体レーザ装置「端面励起微細ロッド型レーザモジュール」 特許番号 200360738
- ・レーザ装置 「薄型スラブ・ロッドレーザの直接水冷冷却」 申請中
- ・固体レーザ装置 「非線形材料を用いた準4準位レーザの超短パルス発生、高効率化および出力の安定化に関する技術」 申請中
- ・レーザ装置「薄型スラブ・ロッドレーザの熱レンズ補償方法」 申請中
- ・レーザ装置「薄型スラブ・ロッドレーザの寄生発振抑制技術」 申請中

8. 参考文献

- [1]H. W. Bruesselbach, D. S. Sumida, R. A. Reeder, and R. W. Byren, "Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **3**, 105 (1997).
- [2]C. Bibeau, R. J. Beach, S. C. Mitchell, M. A. Emanuel, J. Skidmore, C. A. Ebberts, S. B. Sutton, and K. S. Jancaitis, "High-average-power 1- μ m performance and frequency conversion of a diode-end-pumped Yb:YAG laser," IEEE J. Quantum Electron. **34**, 2010 (1998).
- [3]E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell, J. A. Skidmore, M. A. Emanuel, S. B. Sutton, S. A. Payne, P. V. Avizonis, R. S. Monroe, and D. G. Harris, "High-power dual-rod YbYAG laser," Opt. Lett. **25**, 805 (2000).
- [4]A. Giesen, H. Huegel, A. Voss, K. Wittig, U. Brauch, and H. Opower, "concept for diode-pumped

- high-power solid-state-lasers," *Appl. Phys. B: Solids Surf.* **58**, 365 (1994).
- [5] C. Stewen, M. Larionov, A. Giesen, and K. Contag, *Advanced Solid State Lasers*, OSA Technical Digest Optical Society of America, Washington, DC, (2000), p. 13.
- [6] J. A. der Au, G. J. Sphler, T. Sdmeyer, R. Paschotta, R. Hvel, M. Moser, S. Erhard, M. Karszewski, A. Giesen, and U. Keller, "16.2-W average power from a diode-pumped femtosecond YbYAG thin disk laser," *Opt. Lett.* **25**, 859 (2000).
- [7] T. S. Rutherford, W. M. Tulloch, S. Sinha, and R. L. Byer, "YbYAG and NdYAG edge-pumped slab lasers," *Opt. Lett.* **26**, 986 (2001).
- [8] G. D. Goodno, S. Palese, J. Harkenrider, and H. Injeyan, "YbYAG power oscillator with high brightness and linear polarization," *Opt. Lett.* **26**, 1672 (2001).
- [9] K. Sueda, S. Kawato and T. Kobayashi, "High-efficiency LD-pumped microthickness Yb:Y₃Al₅O₁₂ slab laser," *Appl. Phys. Lett.*, **87**, 15110 (2005).